ТЕХНИЧЕСКАЯ ЗАПИСКА / ПОДШИПНИКИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Радиальный вкладыш с медным теплоотводом на торцевых буртах

Л.Артилаква

Аннотация

Рассмотрен радиальный подшипник с принудительной смазкой. Медный слой между сталью и баббитом выходит на торцевые бурты, которые интенсивно омывает масло после выхода из рабочего зазора. Для буртов Ø240 мм сопоставлены три расчётных исполнения. Отдельно описаны технология наплавки по UA35079U и прежнее испытание, в котором температура снизилась с **75 до 66 °C** при неизменных остальных параметрах.

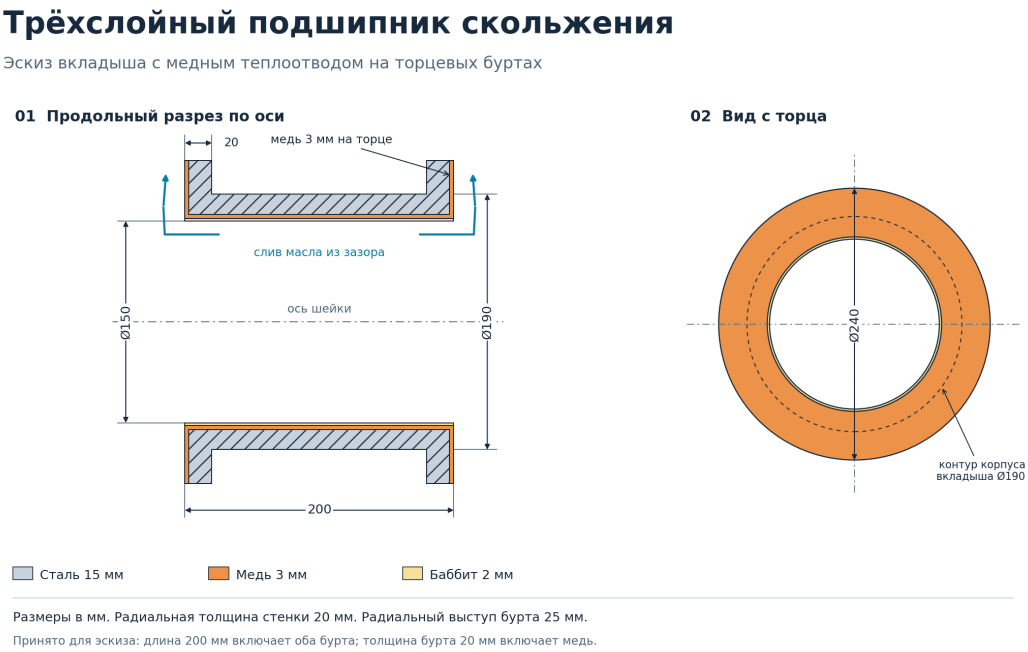


Рис. 1. Продольный разрез и вид с торца. Медь выделена оранжевым цветом. Стрелки показывают путь сливного масла. Размер 200 мм включает оба бурта. Толщина бурта 20 мм включает медный слой.

Ключевые слова · радиальный подшипник, баббит, медная подложка, торцевой бурт, принудительное омывание.

1. Геометрия и расчётная схема

Величина	Размер, мм	Величина	Размер, мм
Диаметр шейки	150	Наружный диаметр вкладыша	190
Длина вкладыша	200	Диаметр буртов	240
Баббит / медь / сталь	2 / 3 / 15	Толщина бурта с медью	20
Стенка подшипника	20	Выступ бурта по радиусу	25

A. Двухслойный вкладыш со стальными буртами. Толщина баббита составляет 2 мм, стальной основы — 18 мм.

B. Трёхслойный вкладыш со стальными буртами. Медь под баббитом доходит до основания буртов.

C. Трёхслойный вкладыш, в котором медный слой толщиной 3 мм непрерывно выходит на торцевую поверхность каждого бурта. Остальная толщина бурта приходится на сталь.

В модели масло омывает по одной кольцевой поверхности каждого бурта между радиусами 95 и 120 мм. Омываемая площадь обоих буртов S = 2π(0,120² − 0,095²) = **0,03377 м²**.

Тепло идёт из среднего сечения по металлу к двум торцам. Каждый путь представлен последовательностью осевого сопротивления стенки, радиального сопротивления основания и сопротивления омываемого кольца. Две торцевые ветви работают параллельно.

Осевое сопротивление одного пути

r_1 = 0,077 м (граница баббита) · r_2 = 0,080 м (граница меди)
A_{Cu} = π(0,080² − 0,077²) = 0,001480 м²
A_{St} = π(0,095² − 0,080²) = 0,008247 м²
$A_0 = A_{Cu} + A_{St}$ = 0,009726 м²

$$R_{z,A} = \frac{0{,}100}{45 A_0} = 0{,}22847\ \mathrm{K\,W^{-1}}$$

$$R_{z,B} = R_{z,C} = \frac{0{,}100}{390 A_{Cu} + 45 A_{St}} = 0{,}10547\ \mathrm{K\,W^{-1}}$$

Приняты λ_{Cu} = 390 и λ_{St} = 45 Вт·м⁻¹·K⁻¹, идеальный контакт слоёв и длина осевого пути 0,100 м [1, 2]. Осевая тепловая проводимость трёхслойной стенки в **2,17 раза** выше, чем у двухслойной. Баббит задаёт внутреннюю границу металлической основы. Температурный перепад для расчёта задан от металла под баббитом до масла у буртов.

Радиальное сопротивление основания бурта

$$K = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \delta_i$$

Для A и B (один слой) K = 45 × 0,020 = 0,900 Вт·K⁻¹.
Для C (два слоя) K = 45 × 0,017 + 390 × 0,003 = 1,935 Вт·K⁻¹.

$$R_r = \frac{\ln\left(\frac{0{,}095}{0{,}080}\right)}{2\pi K}$$

Для A и B получаем 0,03039 K·Вт⁻¹, для C — 0,01413 K·Вт⁻¹.

Участок от r = 80 до 95 мм представлен сосредоточенным сопротивлением с постоянной толщиной. Переход тепла из стенки в бурт в этой модели сведён к одному узлу.

2. Расчёт омываемого кольца

Бурт от r = 95 до 120 мм моделируется как кольцевое ребро с распределённой теплоотдачей [3]. Пусть θ(r) = T(r) − $T_{масла}$, а q(r) — поток, проходящий по металлу через цилиндрическое сечение радиуса r. Ниже записаны уравнения для теплоотдачи с одной плоской стороны бурта.

$$q = -2\pi r K \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}r}, \qquad \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}r} = -2\pi r h \theta, \qquad q(0{,}120) = 0$$

$$R_k = \frac{\theta(0{,}095)}{q(0{,}095)}, \qquad Q_{\mathrm{end}} = \frac{2\Delta T}{R_z + R_r + R_k}$$

Q_{end} — суммарный тепловой поток через оба бурта.

При численном решении задано θ(0,095) = 1 K. Начальный поток подбирается из условия нулевого потока через наружную кромку.

Проверка баланса для каждого варианта дала совпадение начального потока с интегралом 2πh∫rθ(r)dr по омываемому кольцу. Коэффициент h задан одинаковым для всех материалов, чтобы выделить влияние теплопроводности.

Пример при интенсивном омывании

Для сценария **h = 500 Вт·м⁻²·K⁻¹** и **ΔT = 10 K** расчёт на один торец даёт следующие сопротивления и тепловые потоки. Сопротивления относятся к одному бурту, а поток — к обоим.

Вариант	Rz, K·Вт⁻¹	Rr, K·Вт⁻¹	Rк, K·Вт⁻¹	Q через два бурта, Вт
A	0,22847	0,03039	0,13352	51,0
B	0,10547	0,03039	0,13352	74,2
C	0,10547	0,01413	0,12554	81,6

$$Q_C = \frac{2 \times 10}{0{,}10547 + 0{,}01413 + 0{,}12554} = 81{,}6\ \mathrm{W}$$

$Q_C - Q_B$ = 7,3 Вт (+9,9%). $Q_C - Q_A$ = 30,6 Вт (+60,1%).

3. Влияние интенсивности омывания

h, Вт·м⁻²·K⁻¹	A, Вт	B, Вт	C, Вт	C − B, Вт	Прирост C к B, %
100	23,1	26,9	27,8	0,9	3,4
250	39,1	51,5	55,0	3,5	6,7
500	51,0	74,2	81,6	7,3	9,9
1000	60,1	95,3	107,6	12,3	12,9

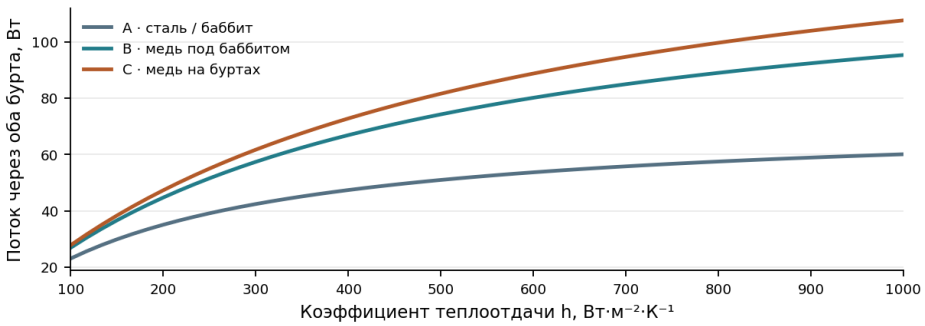


Рис. 2. Торцевой тепловой поток при ΔT = 10 K. Значения h заданы для расчёта.

Испытание и интерпретация

При замене вкладыша на трёхслойный с выходом подслоя на бурты температура снизилась с **75 до 66 °C**. Остальные конструктивные и технологические параметры были сохранены. Разность **9 °C** относится к ранее испытанному исполнению.

Для буртов Ø240 мм в настоящей записке приведён расчёт. Промежуточное исполнение B отдельно не испытывалось, поэтому вклад выхода меди на бурты определён здесь только расчётно.

При принудительном омывании усиление теплоотдачи повышает роль теплопроводности самого бурта. В исполнении B медь уже проводит тепло по длине вкладыша. Исполнение C даёт дополнительный выигрыш за счёт переноса тепла от основания к наружной части кольца. В сценарии $h = 500$ Вт·м$^{-2}$·K^{-1} такой выигрыш составляет 7,3 Вт через оба бурта при фиксированном $\Delta T = 10$ K.

Расчёт торцевой ветви не определяет температуру подшипника. Для расчёта температуры необходим совместный баланс теплообразования и отвода через масляную плёнку, вал, корпус и бурты. В балансе масла используется объёмный расход Q_v и соотношение $P = \rho c_p Q_v (T_{вых} - T_{вх})$ [4]. Если температура масла измеряется после обмыва буртов, тепло от буртов уже включено в энтальпийный прирост этого потока. Повторное суммирование привело бы к двойному учёту.

В расчёте использованы осевая симметрия, равномерное омывание и одинаковая температура масла у обоих торцов. Коэффициент теплоотдачи, локальная температура сливного масла и неопределённость измерения температуры подшипника для испытания не приведены. По этой причине сценарные значения в ваттах приведены отдельно от измеренного результата в градусах.

4. Технология изготовления по UA35079U

Украинская полезная модель **UA35079U** «Спосіб виготовлення вкладиша підшипника ковзання» опубликована 26.08.2008. Заявка u200805595 подана 29.04.2008 [13].

Авторы полезной модели — Л. Ш. Артилаква, Л. В. Панасовский, Е. Э. Третьяков и И. Г. Нещерет.

Операция	Что предусматривает патент
1. Наплавка промежуточного слоя	Оловянистую бронзу наплавляют в аргоне плавящимся электродом в импульсном режиме на внутреннюю поверхность стальной основы и по торцам вкладыша.
2. Подготовка заготовки	В примере выполнения указана термообработка для снятия напряжений при 610–630 °C, затем токарная обработка до требуемой конфигурации.
3. Антифрикционный слой	На внутреннюю поверхность бронзового слоя наплавляют баббит неплавящимся электродом в аргоне. После наплавки выполняют окончательную токарную обработку.

Пункт 1 формулы задаёт последовательность наплавки и расположение бронзового слоя. Пункт 2 уточняет материал антифрикционного покрытия — баббит. Описание прямо связывает бронзу на внутренней поверхности и торцах с усилением отвода тепла и сообщает снижение средней температуры на **6–8 °C** относительно прототипа [13, л. 2 скана].

Результат **75 → 66 °C** получен в ранее проведённом испытании. В патенте эти две температуры не указаны.

Влияние материала подслоя на расчёт

В разделах 1–3 принят сценарий для меди с теплопроводностью 390 Вт·м$^{-1}$·K^{-1}. Для наплавленной оловянистой бронзы патент не указывает марку и теплопроводность. Ниже показана чувствительность модели к условным значениям λ слоя. Во всех строках h = 500 Вт·м$^{-2}$·K^{-1} и ΔT = 10 K. Для двухслойного вкладыша A расчёт даёт 51,0 Вт.

λ, Вт·м$^{-1}$·K^{-1}	B, стальные бурты, Вт	C, открытый подслой, Вт	C − B, Вт
50	51,5	51,6	0,1
75	53,9	54,5	0,6
100	56,1	57,2	1,1
390	74,2	81,6	7,3

Строки 50–100 Вт·м$^{-1}$·K^{-1} показывают чувствительность расчёта, а 390 Вт·м$^{-1}$·K^{-1} соответствует прежнему сценарию для меди. Для выбора расчётного значения для испытанного вкладыша нужны данные о материале фактической наплавки.

5. Оригинальность конструкции

Поиск охватывал публикации по материалам вкладышей, охлаждению подшипников и отводу масла через торцы. Сопоставлялись признаки конструкции и траектория потока масла. Ближайшие документы приведены ниже.

Источник	Общий признак и отличие
Дьяков и Воскресенский, 1980 [5]	Упорная колодка из стали, меди и баббита. Теплоотвод медным слоем описан для упорных колодок.
UA35079U, 2008 [13]	Формула предусматривает слой оловянистой бронзы на внутренней поверхности и на торцах. В описании указан отвод тепла. Схема омывания открытых буртов сливным маслом в формуле не указана.
US6485182B2, 2002 [6]	Медный теплопроводный материал под баббитом и охлаждение подшипника маслом. Охлаждение использует подачу свежего холодного масла по отдельной ветви.
RU150268U1, 2015 [7]	Стальной радиальный вкладыш, подслой на основе меди и баббит Б-83. Медный подслой расположен на внутренней цилиндрической поверхности.
US4917509A, 1990 [8]	Стальной вкладыш с буртом и облицовкой из медного сплава на внутренней поверхности. На бурте предусмотрена отдельная защитная пластина.
WO2014046865A1, 2014 [9]	Масло, вышедшее из рабочего зазора, попадает в кольцевой канал. Канал выполнен для сбора масла и его отвода в картер.
CN201851492U, 2011 [10]	Стальной вкладыш с бронзовой облицовкой и приваренной торцевой шайбой. В облицовке предусмотрена твёрдая смазка.
EP0029471A1, 1981 [11]	Медный корпус, железный промежуточный слой и баббит. Повышенный теплоотвод обеспечивается медным корпусом.

Выход слоя медного сплава на торцы ради усиления теплоотвода документирован патентом авторского коллектива 2008 года [13]. Из описания UA35079U нельзя установить геометрию буртов и схему их принудительного омывания сливным маслом. Именно это сочетание остаётся отличием испытанного исполнения в пределах проведённого поиска.

Документы 2011–2015 годов приведены для технического сравнения и опубликованы после UA35079U. Вывод об изобретательском уровне конкретной схемы омывания остаётся предварительным [12].

Вывод

Применение предлагаемой конструкции позволяет усилить отвод тепла из рабочей зоны вкладыша через торцевые бурты. Медный подслой проводит тепло от баббита к открытым поверхностям буртов, которые принудительно омываются маслом после его выхода из рабочего зазора.

В ранее испытанном узле трёхслойный вкладыш с выходом подслоя на бурты дал снижение температуры на **9 °C**.

Для геометрии Ø150 × 200 мм с буртами Ø240 мм модель с чистой медью при h = 500 Вт·м$^{-2}$·K^{-1} показывает **81,6 Вт** через медные бурты против **74,2 Вт** через стальные при одинаковой трёхслойной стенке и перепаде 10 K.

Источники

1. Space Materials Database. CDA 110, теплопроводность меди. Источник
2. National Bureau of Standards. Circular 556, обзор теплопроводности металлов и сплавов. Источник
3. Differential transformation method to determine heat transfer in annular fins. DOI 10.1002/htj.22252
4. ISO/TS 31657-1:2020. Hydrodynamic plain journal bearings, § 6.5. Источник
5. Дьяков В. И., Воскресенский В. А. Расчёт и проектирование опор скольжения. 1980. Источник
6. US6485182B2. Sleeve bearing with bypass cooling. 2002. Источник
7. RU150268U1. Вкладыш радиального подшипника скольжения турбины. 2015. Источник
8. US4917509A. Flanged bearing and process for producing same. 1990. Источник
9. WO2014046865A1. Bushing for oil film bearing. 2014. Источник
10. CN201851492U. Биметаллический подшипник скольжения с фланцем. 2011. Источник
11. EP0029471A1. Корпус подшипника скольжения высокой теплопроводности. 1981. Источник
12. European Patent Office. Guidelines for Examination, G-VII, 6. Источник
13. UA35079U. Спосіб виготовлення вкладиша підшипника ковзання. Опубликовано 26.08.2008, бюл. № 16. Скан описания и формулы